



SAE MÜHENDİSLİK
ENGINEERING & CONSULTING

TEKNİK YAYINLAR • No. 16

Yüzey İşlemleri ve Kaplamalar

Yüzey sertleştirme, elektrolitik ve kimyasal kaplama, eloksal, termal püskürtme, PVD/CVD; kalınlık ve yapışma ölçümü, hidrojen gevrekliği ve yorulmaya etkisi

Hazırlayan: Ahmet Asım ESER — SAE Mühendislik ve Danışmanlık Hizmetleri

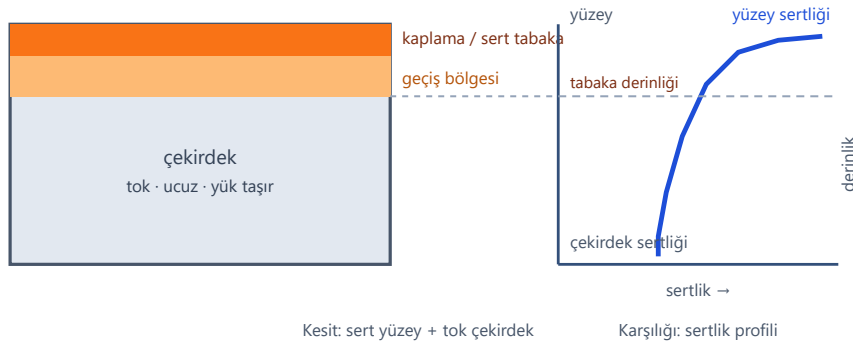
Sürüm: 1.0 • **Tarih:** Ekim 2026 • **saemuhendislik.com**

Bu doküman SAE Mühendislik tarafından özgün olarak hazırlanmıştır. Kaynak gösterilerek alıntı yapılabilir.

1. Giriş: Parça Yüzeyinden Bozular

Bir makine parçasının servis ömrünü belirleyen olayların neredeyse tamamı **yüzeyde** başlar: yorulma çatlakları yüzeyden çekirdeklenir, aşınma yüzeyi yer, korozyon yüzeyden ilerler. Buna karşılık mukavemet, tokluk ve maliyet **çekirdeğin** işidir.

Yüzey mühendisliğinin temel fikri bu ayrımı kullanmaktır: **ucuz ve tok bir çekirdek** üzerine, yalnızca ihtiyaç duyulan yerde **sert, aşınmaya ve korozyona dayanıklı ince bir katman** kurmak. Bu, malzemeyi baştan sona pahalı bir alışımından yapmaktan hem daha ucuz hem çoğu zaman daha güvenlidir — çünkü tüm kesiti sertleştirmek tokluğu düşürür.



Şekil 1 — Yüzey mühendisliğinin temel şeması: yük taşıyan tok bir çekirdek, üzerinde ince ve sert bir tabaka. Kabul ölçütü tek bir yüzey sertliği değil, **sertlik profili ve tabaka derinliğidir** (ölçümü için bkz. **No.13**). (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir.)

2. Sınıflandırma

Yüzey işlemleri üç temel gruba ayrılır; hangisinin seçileceği, **boyutun değişip değişmeyeceği** ve **ne kadar ısıya dayanılabileceği** sorularıyla belirlenir:

Grup	Ne yapar	Örnekler
Mevcut yüzeyi dönüştürür	Malzeme eklemes; yüzeyin yapısını veya bileşimini değiştirir	İndüksiyonla sertleştirme, sementasyon, nitrürleme, eloksallama, fosfatlama
Üzerine katman ekler	Boyut büyür; katman ile altlık arasında arayüz vardır	Elektrolitik kaplama, kimyasal nikel, termal püskürtme, PVD/CVD, boya
Mekanik olarak işler	Yüzey topografyasını ve artık gerilmeyi değiştirir	Bilyalı dövme (shot peening), parlatma, honlama, kumlama

3. Yüzey Sertleştirme

3.1 Isıl yöntemler — bileşim değişmez

Yalnızca yüzey östenitleme sıcaklığına çıkarılıp hızla soğutulur; çekirdek dokunulmadan kalır. Çeliğin **zaten yeterli karbon içermesi** gerekir (tipik olarak $\geq 0,35\text{ C}$).

- İndüksiyonla sertleştirme:** Yüzeyde girdap akımı ile ısıtma. Hızlı, temiz, otomasyona uygun, derinlik frekansla ayarlanır (yüksek frekans → sıgı tabaka). Mil yatak yüzeyi, dişli, kam.

- **Alevle sertleştirme:** Daha basit ve ucuz; büyük ve tek parça işler için uygun, derinlik kontrolü daha kabadır.
- **Lazerle sertleştirme:** Çok dar ve kontrollü bölge; çarpılma en düşük, maliyet en yüksek.

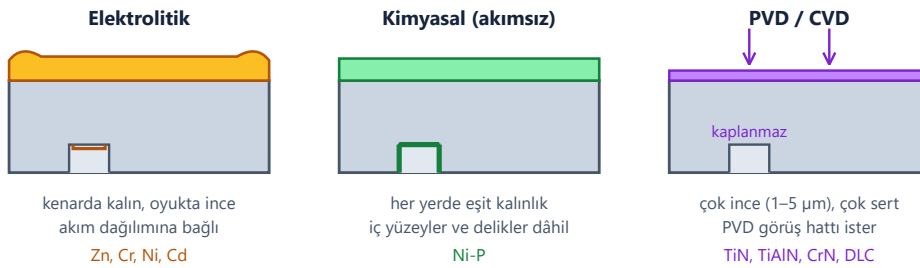
3.2 Termokimyasal yöntemler — bileşim değişir

Yöntem	Sıcaklık / eklenen	Tipik sertlik ve derinlik	Notlar
Sementasyon (karbürleme)	880–950 °C · karbon	58–63 HRC · 0,3–2 mm	Düşük karbonlu çelik (16MnCr5, 18CrNiMo7-6). Su verme gerekir → çarpılma; sonrasında taşlama payı bırakılır
Karbonitrürleme	780–880 °C · C + N	58–62 HRC · 0,1–0,8 mm	Daha düşük sıcaklık → daha az çarpılma; ince tabakalı küçük parçalar
Nitrürleme	500–580 °C · azot	700–1100 HV · 0,1–0,6 mm	Su verme yok → çarpılma çok düşük. Islah edilmiş, Al/Cr/Mo içeren çelikler (31CrMoV9, 42CrMo4). Yüksek yorulma ve temperleme direnci
Nitrokarbürleme	≈570 °C · N + C	Beyaz tabaka 5–25 µm	Ucuz, hızlı, aşınma + korozyon; oksidasyonla birleştirilerek koyu dekoratif yüzey elde edilir
Borlama	800–1000 °C · bor	1600–2000 HV · 20–200 µm	Çok sert ama kırılgan; abrazyon aşınmada üstün

Seçimin iki soruyla özeti: (1) **Parça çarpılmayı kaldırabilir mi?** Hayır ise nitrürleme/nitrokarbürleme (düşük sıcaklık, su verme yok). (2) **Yüksek yüzey basıncı var mı?** Evet ise sementasyon — kalın ve destekli tabaka gerekir; ince nitrür tabakası yüksek Hertz basıncı altında altından çöker ("yumurta kabuğu etkisi").

4. Kaplamalar

Altlık her üç durumda aynı; fark kaplamanın dağılımında ve kalınlığında.



Şekil 2 — Üç kaplama ailesinin örtme davranışı. Elektrolitik kaplamada akım yoğunluğu kenarlarda yüksek olduğu için **kalınlık eşit değildir**; kimyasal nikel **her yüzeyde aynı kalınlığı** verir; PVD çok ince ve görüş hattına bağlıdır. (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir.)

4.1 Elektrolitik kaplama

Kaplama	Ne için	Dikkat
Çinko (+ pasivasyon)	Çelikte katodik korozyon koruması	Ucuz ve yaygın. Çizilse bile korur (bkz. No.12). Kalınlık ve pasivasyon tipi ISO 4042 / ISO 2081'e göre belirtilir
Nikel	Korozyon + dekoratif ara tabaka	Soy kaplama: gözenek/çizik noktasında altlığı hızlandırır
Sert krom	Aşınma direnci, 800–1100 HV	Mikro çatlaklı yapı; yorulma dayanımını düşürür . Cr(VI) kullanımı REACH kapsamında kısıtlı
Kadmiyum	Havacılıkta özel durumlar	Toksik; çoğu uygulamada yasaklı/terk edilmiş

4.2 Kimyasal (akımsız) nikel — Ni-P

Elektrik akımı yerine kimyasal indirgeme kullanır. En büyük avantajı **kalınlık düzgünlüğüdür**: karmaşık geometri, iç yüzey, delik ve dış aynı kalınlıkta kaplanır. Fosfor oranı davranışı belirler: **düşük P (%2–5)** daha sert ve manyetik, **yüksek P (%10–13)** amorf yapı ve **çok iyi korozyon direnci** verir. 300–400 °C'de yaşlandırma ile sertlik 500 HV'den ≈1000 HV'ye çıkarılabilir. Standart: ISO 4527.

4.3 Eloksal (anodik oksitleme) — alüminyum

Alüminyumun kendi oksit tabakasını kontrollü biçimde kalınlaştırır; katman **eklenmez, büyütülür** ve yarısı yüzeyin içine doğru ilerler. Dekoratif eloksal 5–25 µm, **sert eloksal** 25–100 µm ve 400–600 HV mertebesinde. Gözenekli yapı boya tutar; **kaynatma/kapama (sealing)** adımı atlanırsa korozyon direnci büyük ölçüde kaybedilir. Standart: ISO 7599, sert eloksal için ISO 10074.

4.4 Termal püskürtme

Ergimiş veya yumuşamış parçacıklar yüzeye püskürtülerek **lamel yapılı** bir katman kurar (alev, ark, plazma, HVOF). 50 µm–birkaç mm kalınlık mümkündür; aşınmış parçaların **ölçüye geri getirilmesinde** ve termal bariyer kaplamalarda kullanılır. Yapışma çoğunlukla **mekanik kenetlenmedir** → yüzey pürüzlendirme (kumlama) zorunludur. HVOF ile uygulanan WC-Co kaplamalar, sert kromun başlıca alternatifidir. Standart: ISO 2063, yapışma deneyi ISO 14916.

4.5 PVD / CVD

- PVD** (fiziksel buhar biriktirme): 200–500 °C, 1–5 µm, 2000–3500 HV. Kesici takım, kalıp, dekoratif. **Görüş hattı** gerektirir; derin delik iç yüzeyi kaplanamaz. Düşük sıcaklık sayesinde ıslah edilmiş parça temperlenmez.
- CVD**: 800–1000 °C, daha kalın ve daha iyi yapışan katman, karmaşık geometriyi örter; ancak **yüksek sıcaklık** altlığın ısıl işlemini bozar — işlem sonrası yeniden sertleştirme gerekebilir.
- DLC** (elmas benzeri karbon): çok düşük sürtünme katsayısı; yağlamanın sınırlı ya da hiç olmadığı yerlerde (kuru sürtünme, vakum, gıda ekipmanı) tercih edilir.

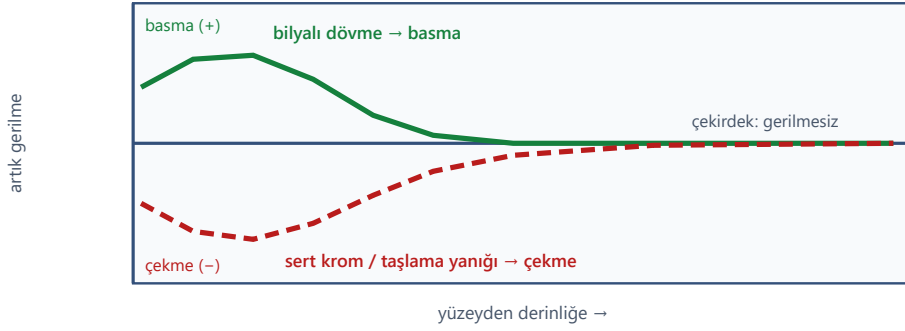
5. Mekanik Yüzey İşlemi: Bilyalı Dövme

Küçük bilyelerin yüzeye çarptırılmasıyla ince bir tabaka plastik olarak uzar; çevresindeki malzeme buna direnç gösterince yüzeyde **basma artık gerilmesi** kalır. Yorulma çatlakları açılmak için çekme gerilmesine ihtiyaç

duyduğundan, bu basma alanı **çatlak başlangıcını geciktirir**.

- Yorulma ömründe kat kat artış sağlayabilir — yay, dişli dibi, krank mili ve kaynak dikiş ayağında standart uygulamadır.
- Şiddet **Almen şeridi** ile ölçülür (A, N, C şeritleri; ör. 0,20 A); **kapsama oranı** (coverage) ayrıca belirtilir. Standart: SAE J442 / J443, ISO 26910.
- Aşırı dövme yüzeyi katlar ve mikro çatlak üretir — "ne kadar çok o kadar iyi" değildir.
- Etkisi yüksek sıcaklıkta gevşeyebilir (gerilme relaksasyonu); sıcak servis için ömrü sınırlı sayılmalıdır.

6. İki Kritik Yan Etki



Aynı parçaya uygulanan iki işlem, yorulma ömrünü zıt yönlerde değiştirir.

Şekil 3 — Yüzey işlemlerinin artık gerilme imzası. **Basma** bırakan işlemler yorulma ömrünü uzatır; **çekme** bırakanlar kısaltır. Bu yüzden bir kaplama kararı, aynı zamanda bir yorulma kararıdır (bkz. **No.9**). (SAE Mühendislik özgün çizimi, şematiktir.)

6.1 Hidrojen gevrekliği

Asitle temizleme ve elektrolitik kaplama sırasında açığa çıkan hidrojenin bir kısmı çeliğe girer. Yüksek dayanımlı çeliklerde (tipik olarak $\geq 1000 \text{ MPa}$ veya $\geq 32 \text{ HRC}$) bu hidrojen, yük altında **gecikmeli gevrek kırılmaya** yol açar — parça kaplamadan saatler ya da günler sonra, servis yükünün altında kırılabilir.

- **Çözüm:** kaplamadan sonra en geç **4 saat içinde** hidrojen giderme tavlı (tipik 190–230 °C, 2–24 saat; süre dayanıma ve kesite göre). Standart: ISO 9588 / ASTM B850.
- **Doğrulama:** ASTM F519 çentikli numune ile 200 saat sürekli yük deneyi.
- **Alternatif:** hidrojen üretmeyen yöntemler — mekanik çinko kaplama, çinko lamel (dakromet tipi) kaplama, termal püskürtme.

Saha kuralı: Yüksek dayanımlı civata, yay ve emniyet parçalarında kaplama talimatına **hidrojen giderme tavlı ve süresi mutlaka yazılır**. Bu satır olmadan verilen bir kaplama siparişi, ileride açıklanması güç bir kırılmanın başlangıcıdır.

6.2 Yorulma dayanımına etki

İşlem	Yorulmaya etkisi	Nedeni
Bilyalı dövme	Belirgin artış	Yüzeyde basma artık gerilmesi
Sementasyon / nitrürleme	Artış	Sert tabaka + basma gerilmesi
Kimyasal nikel (Ni-P)	Hafif düşüş	Çekme gerilmeli, sert ve kırılgan katman
Sert krom	Düşüş (bazen %30–60)	Mikro çatlaklı yapı + çekme artık gerilmesi
Eloksal (özellikle sert)	Düşüş	Gevrek oksit; çatlak doğrudan altlığa geçer
Taşılama yanığı	Ciddi düşüş	Yeniden sertleşmiş gevrek tabaka + çekme gerilmesi

Yorulmaya karşı sert krom veya sert eloksal gerekiyorsa, **önce bilyalı dövme uygulanıp sonra kaplanması** yaygın bir telafi yöntemidir.

7. Her Şeyden Önce: Yüzey Hazırlığı

Kaplama hatalarının büyük bölümü kaplama banyosundan değil, **öncesindeki temizlikten** doğar. Tipik sıra: yağ alma → durulama → asitle temizleme (pas/tufal) → aktivasyon → kaplama → durulama → kurutma (→ hidrojen giderme).

- **Yağ ve gres** yapışmayı doğrudan öldürür; parmak izi bile yeterlidir.
- **Tufal ve oksit** kaldırılmazsa katman onunla birlikte kalkar.
- **Pürüzlülük** termal püskürtme ve boyada mekanik kenetlenme için gereklidir; boyada yüzey hazırlık derecesi ISO 8501-1'e göre (ör. Sa 2½) şartnameye yazılır.
- **Keskin köşe ve çapak** her kaplamada en ince noktadır; radyus verilmesi kaplamanın ömrünü uzatır.

8. Ölçüm ve Muayene

Ölçülen	Yöntem	Standart
Kaplama kalınlığı (tahribatsız)	Manyetik / girdap akımı probu, XRF	ISO 2178 · ISO 2360 · ISO 3497
Kaplama kalınlığı (kesitten)	Metalografik kesit + mikroskop	ISO 1463 (bkz. No.10)
Tabaka derinliği (CHD / NHD)	Sertlik profili	ISO 2639 · ISO 18203 (bkz. No.13)
Yapışma	Kesme-ızgara, çekip koparma, bükme, termal şok	ISO 2409 · ISO 4624 · ISO 14916
Sertlik (ince tabaka)	Mikro Vickers / Knoop, nanoindentasyon	ISO 6507 · ISO 4545
Korozyon direnci	Tuz sisi (karşılaştırma amaçlı)	ISO 9227 (sınırları için bkz. No.12)
Gözeneklilik	Ferrosil / elektrografik test	ISO 10309
Hidrojen gevrekliği	Sürekli yük altında çentikli numune	ASTM F519 · ISO 9588

9. Seçim Rehberi

İhtiyaç	Öncelikli seçenekler
Çelikte atmosferik korozyon	Sıcak daldırma galvaniz (kalın, uzun ömür) · elektrolitik çinko + pasivasyon (ince, ölçü hassas)
Yüksek yüzey basıncı + aşınma (dişli, kam)	Sementasyon + taşlama; çarpılma sorunsu nitrürleme
Boyut değişmesin, çarpılma olmasın	Nitrürleme · nitrokarbürleme · PVD
Karmaşık geometri, iç yüzeyler	Kimyasal nikel (Ni-P) · nitrokarbürleme
Kesici takım / kalıp ömrü	PVD (TiAlN, CrN) · DLC
Aşınmış parçanın ölçüye getirilmesi	Termal püskürtme (HVOF) · lazer kaynak dolgu
Alüminyumda sertlik ve aşınma	Sert eloksal (yorulma düşüşü kabul edilebiliyorsa)
Yorulma ömrünü uzatmak	Bilyalı dövme (tek başına veya kaplama öncesi)

10. Pratik Kontrol Listesi

- Asıl ihtiyaç ne — **aşınma mı, korozyon mu, görünüm mü, yorulma mı?** Hepsi aynı kaplamayla çözülmez.
- Parça **çarpılmayı** ve **boyut artışı**nı kaldırır mı? Tolerans kaplama sonrası mı tutuluyor?
- Altlık malzemesi ve ısıt işleme durumu, işleme sıcaklığına dayanıyor mu (ıslah edilmiş parça + CVD = temperlenme)?
- Dayanım ≥ 1000 MPa ise **hidrojen giderme tavl**ı talimata yazıldı mı, süresi belirtildi mi?
- Kaplama kalınlığı **hangi noktada** ölçülecek? (Elektrolitikte kenar ile oyuk farklıdır — ölçüm noktası resimde gösterilmeli.)
- Yapışma deneyi ve kabul ölçütü şartnamede var mı?
- Keskin köşeler yuvarlatıldı, çapaklar alındı mı?
- Farklı metal teması doğacaksa galvanik risk değerlendirildi mi (bkz. **No.12**)?
- Yorulma kritik bir parçaysa kaplamanın **ömre etkisi** hesaba katıldı mı?

11. Yararlanılan Temel Kaynaklar

- ASM International, *ASM Handbook Vol. 5: Surface Engineering*, 1994.
- ASM International, *ASM Handbook Vol. 4A–4D: Heat Treating* (yüzey sertleştirme bölümleri), 2013–2014.
- Davis, J.R. (ed.), *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*, ASM International, 2001.
- Holmberg, K. & Matthews, A., *Coatings Tribology*, 2. baskı, Elsevier, 2009.
- Schlesinger, M. & Paunovic, M. (ed.), *Modern Electroplating*, 5. baskı, Wiley, 2010.
- İlgili standartlar*: ISO 2081, ISO 4042, ISO 4527, ISO 7599, ISO 10074, ISO 2063, ISO 14916, ISO 2178, ISO 2360, ISO 3497, ISO 1463, ISO 2409, ISO 4624, ISO 10309, ISO 2639, ISO 18203, ISO 9588, ISO 8501-1, ASTM B850, ASTM F519, SAE J442 / J443, ISO 26910.